

DOI: 10.5846/stxb202104100930

孙倩莹, 高艳妮, 杨春艳, 王世曦, 刘学, 冯朝阳. 基于历史参照系的三江源区径流调节功能及变化评估. 生态学报, 2022, 42(22): 9226–9238.

Sun Q Y, Gao Y N, Yang C Y, Wang S X, Liu X, Feng C Y. Assessment of runoff regulation function and its change in the Three Headwater Region based on a historical reference system. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9226–9238.

基于历史参照系的三江源区径流调节功能及变化评估

孙倩莹^{1,2}, 高艳妮^{1,2,*}, 杨春艳^{1,2}, 王世曦^{1,2}, 刘学^{1,2}, 冯朝阳^{1,2}

1 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2 中国环境科学研究院, 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

摘要:以 20 世纪 70 年代植被类型图作为参照生态系统, 采用径流量和径流系数作为径流调节功能的表征指标, 建立了基于历史参照系的三江源区径流调节功能评估模型, 以参照系径流系数与实际径流系数的比值作为径流系数质量指数, 分析了 2000—2017 年三江源区生态系统径流调节功能参照值、现状值及变化量的时空变化规律。结果表明: 2000—2017 年, 三江源区多年平均径流量为 495.15 亿 m³, 地表径流量为 96.64 亿 m³, 参照系条件下多年平均径流量为 468.37 亿 m³, 地表径流量为 68.60 亿 m³。相比参照系, 三江源区生态系统的径流蓄纳能力降低, 总径流量和地表径流量均明显增加。空间上, 基于参照系和实际生态系统的多年平均径流量表现为东南高西北低的空间分布特征, 地表径流量则呈西部高东部低的空间分布特征。从时间变化看, 实际径流和参照系径流的差别率在 4%—9% 之间, 实际地表径流和参照系地表径流的差别率在 22%—58% 之间。径流系数质量指数得分显示, 2000—2017 年, 三江源区径流系数质量指数平均得分为 98.63, 地表径流系数质量指数平均得分为 96.98, 两者均呈现先降低后增加的趋势, 地表径流系数质量指数变化更为明显。2000—2017 年, 各县(镇)径流系数和地表径流系数质量指数得分具有较大差别, 但各县(镇)得分变化均不明显, 变化率分别在 -1.95%—0.71% 和 -0.35%—1.90% 之间。通过建立基于历史生态系统的评估参照系, 定量评估了三江源区参照系和实际条件下的径流变化过程, 实现了不同时间、不同区域生态系统径流调节功能的可比较, 可对量化生态系统恢复进程提供支撑。

关键词:三江源区; SWAT 模型; 径流调节功能; 参照系; 生态系统; 径流系数质量指数

Assessment of runoff regulation function and its change in the Three Headwater Region based on a historical reference system

SUN Qianying^{1,2}, GAO Yanni^{1,2,*}, YANG Chunyan^{1,2}, WANG Shixi^{1,2}, LIU Xue^{1,2}, FENG Chaoyang^{1,2}

1 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: By taking the vegetation map in the 1970s a reference ecosystem and using runoff volume and runoff coefficient as the characteristic indexes of ecosystem runoff regulation function, a runoff regulation function evaluation model based on the SWAT (Soil & Water Assessment Tool) model and a historical reference system was established. Then, the temporal and spatial variation characteristics of runoff regulation function in the Three Headwater Region from 2000 to 2017 were analyzed. Besides, the ratio of the reference runoff coefficient to the actual runoff coefficient was used as the runoff coefficient quality index to describe the deviations of the actual ecosystem from the reference system, for further analysis of the variation characteristics of runoff deviations between the reference ecosystem and the actual ecosystem. Results showed that, between 2000 and 2017, the perennial average runoff and surface runoff were $495.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $96.64 \times 10^8 \text{ m}^3$, and

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500205)

收稿日期: 2021-04-10; 网络出版日期: 2022-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyan@craes.org.cn

the perennial average reference runoff and surface runoff were $468.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $68.60 \times 10^8 \text{ m}^3$. Compared with the reference ecosystem, the runoff storage capacity of ecosystem decreased, resulting in higher runoff and surface runoff. Spatially, the runoff was high in the southeast and low in the northwest, but surface runoff was high in the west and low in the east whether under the reference or actual ecosystems. In terms of the interannual change, we found a visible increase of runoff, especially surface runoff under the actual ecosystem. The difference rate between the actual runoff and the reference runoff ranged from 4% to 9%, and it showed a more pronounced deviation of 22% to 58% of surface runoff. From the runoff coefficient quality index score, the average score of runoff coefficient quality index was 98.63, and the average score of surface runoff coefficient quality index was 96.98 in 2000—2017 in the Three Headwater Region. Generally, both scores showed a trend of first decreasing and then increasing, indicating a process of degradation and then recovery during this period, and the change of surface runoff coefficient quality index was more obvious. The scores of runoff coefficient quality index and surface runoff coefficient quality index varied greatly among regions, but the interannual changes were small, with a change of -1.95% to 0.71%, and a change of -0.35% to 1.90%. By analyzing the temporal and spatial variation characteristics of runoff regulation function based on a historical reference system, the comparison of runoff regulation functions in different ecosystems at different times and in different regions was realized, which could provide support for quantifying the process of ecosystem restoration.

Key Words: the Three Headwater Region; SWAT model; runoff regulation function; reference system; ecosystem; runoff coefficient quality index

三江源区地处青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地,是中国以及东南亚的重要产水区,同时也是亚洲乃至北半球气候变化的“感应器”和“敏感区”。三江源区特殊的地理位置、丰富的自然资源、重要的生态功能使其成为青藏高原生态屏障的重要组成部分。然而,由于该地区海拔高、自然条件恶劣,其生态环境十分脆弱,生态系统质量的变化非常敏感^[1-3],尤其是 20 世纪 70 年代以来,在气候变暖和人为活动不断扩大的双重影响下,冰川消退、江河断流、草地退化、水土流失等问题相继涌现,三江源区生态环境质量呈恶化趋势^[4-6]。党和国家高度重视三江源区生态保护工作,通过建立自然保护区、成立国家公园等体制机制的逐步完善和一系列生态保护与恢复工程的实施,三江源区生态系统退化趋势初步得到遏制^[7-8]。

气候变化和人类活动的双重作用对三江源区水资源供给和径流调节功能造成了重要影响,不少学者针对三江源区的水资源时空分布、演化规律和径流调节能力等进行了研究分析,如:罗玉等^[9]运用滑动平均、累积距平曲线、集中期、集中度、滑动 t 检验、小波分析等方法统计分析了长江源区径流量变化特征;刘希胜等^[10]采用过程线法、集中度和集中期等方法分析了黄河流域降水、径流的演变特征,研究了径流对降水的响应特征;张士锋等^[11]借助气候驱动模型分析了三江源区径流变化的主要气候驱动因素;蒋冲等^[12]通过双累积曲线、相关分析和贡献率分析等方法探讨了影响三江源区年际和年内径流量变化的气候气象因素;张小咏^[13]基于春汛期、夏汛期、枯水期三个不同时段水文参数,分析了气候变化和生态系统退化或转好对生态系统径流调节功能的影响。

径流调节反映了生态系统通过对降水截留、过滤、吸收等,对其时空再分配的过程,在一定程度上起到削峰补枯、缓和地表径流、增加地下径流等的作用,通常采用水量平衡法、降水贮存量法、综合蓄水能力法等方法评估^[14-16]。当前针对径流调节等反映生态质量、生态功能的评估多是基于可观测值或相关可观测值的评估,虽然能够直观给出某一特定时期的变化情况,但由于其缺乏对应时期评价指标的参考值,难以量化其与该区域最优状态之间的差距,量化生态系统的恢复潜力^[17],在一定程度上制约了生态保护措施的开展实施。生态系统参照系是指某地区在长期气候、地形、海拔等自然因素的影响下,经自然演替形成的最优生态系统及其所具有的生理生态特征,具有生物群落发展到顶级植被的生态系统特征,它反映了一种自然原始、未受或极少受人为活动干扰的条件状况。在开展生态系统恢复潜力或生态系统保护成效分析中,通过选取生态系统参照

系,量化参照系条件下关键指标的数值,并把它作为长期的评估标准,就可以科学地量化生态系统的现状与理想状态或最优状态之间的差距。通过建立客观的生态系统评估参照系,定量评估参照系和实际条件下的径流变化过程,有利于厘清自然因素和人为因素的影响,量化生态系统的恢复进程,实现不同时间、不同区域生态系统径流调节功能的可比较。

对此,本研究以科学可比较为评估目标,以径流量和径流系数作为径流调节功能表征指标,建立了基于历史参照系的三江源区径流调节功能评估模型,分析了 2000—2017 年三江源区径流调节功能变化特征;采用参照条件下的径流系数与实际条件下的径流系数的比值作为径流系数质量指数,计算了基于参照系下的三江源区径流系数和地表径流系数质量指数得分变化,分析了三江源区径流调节功能现状和变化情况。

1 研究区概况

三江源区位于我国青海省南部,是长江、黄河、澜沧江的发源地,被誉为“中华水塔”。多年平均水资源量约为 500 亿 m^3 ,分别占长江流域总水量的 20%,黄河流域总水量的 40%和澜沧江流域总水量的 15%^[18]。其行政范围包括玉树、果洛、海南、黄南藏族自治州的 21 个县和格尔木市的唐古拉山镇,区域总面积 39.5 万 km^2 。三江源区是典型的高原大陆性气候,冷热两季交替、干湿两季分明。年平均气温由东南向西北随着纬度和海拔的升高而逐渐下降,区内温度梯度差异明显,降水量分布总体上也呈现出由东南向西北逐渐递减的趋势^[18—19]。三江源区土壤以高山草甸土为主,且土壤空间分布具有明显的垂直地带性规律,区域内以高寒草甸和高寒草原等草地生态系统为主,其次是湿地生态系统,此外还少量分布着森林、灌丛等植被类型^[20—21]。植被随降水变化呈地带性分布,降水量最低的长江源区,其西部最干旱区以荒漠草原为主,逐渐向东部过渡为以针茅为主的高寒草原,东部主要是以高寒嵩草为主的高寒草甸。降水量最高的澜沧江源区,其植被类型以高寒草甸为主,东部边界谷地分布着落叶阔叶灌丛和针叶林。黄河源区内植被整体仍以高寒草甸为主,其北部以温带草原和高寒草原为主,中部偏南部有落叶灌丛分布。

2 数据与方法

2.1 数据

径流数据来源于中国水利统计年鉴,包括长江流域直门达站、黄河流域吉迈站和唐乃亥站、澜沧江流域香达站的逐月径流量。气象数据来源于中国气象共享网,包括三江源区内气象站点的日降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、日平均相对湿度和日平均风速数据,及辐射站点的日太阳辐射数据(站点分布图见图 1)。植被类型数据来源于中科院植物所的 1:100 万中国植被类型图^[22]。生态系统类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率为 30 m,共包括 2000,2005,2010 和 2015 年 4 期生态系统类型图,本研究以各期生态系统类型图代表最近 5 年的生态系统类型情况(2000—2002 年采用 2000 年数据,2003—2007 年采用 2005 年数据,2008—2012 年采用 2010 年数据,2013—2017 年采用 2015 年数据)。地形高程数据来源于地理空间数据云,空间分辨率为 90 m;土壤类型图来源于国家青藏高原科学数据中心“基于世界土壤数据库的中国土壤数据集(v1.1)(2009)”。

2.2 研究方法

径流系数是表征流域降雨产流能力的重要参数,它是指某一时段内汇水面积上的产流量与相应时段内的降雨量的比值,反映了流域内自然地理因素对降水形成径流过程的影响。径流系数主要受降水总量、降水强度和下垫面影响^[23—25],具有明显的区域特征。本研究利用 SWAT (Soil & Water Assessment Tool) 模型模拟区域径流量,选取径流系数和地表径流系数来反映三江源区生态系统的径流调节功能,以参照系径流系数与实际径流系数的比值作为径流系数质量指数,评价实际生态系统相较于优良生态系统径流调节功能的偏离情况,分析三江源区生态系统径流调节功能参照值、现状值及变化量的时空变化规律。

2.2.1 参照系确定

生态系统参照系的选取应尽量体现未经过自然与人为因素扰动后的生态系统特征^[17]。研究表明,三江

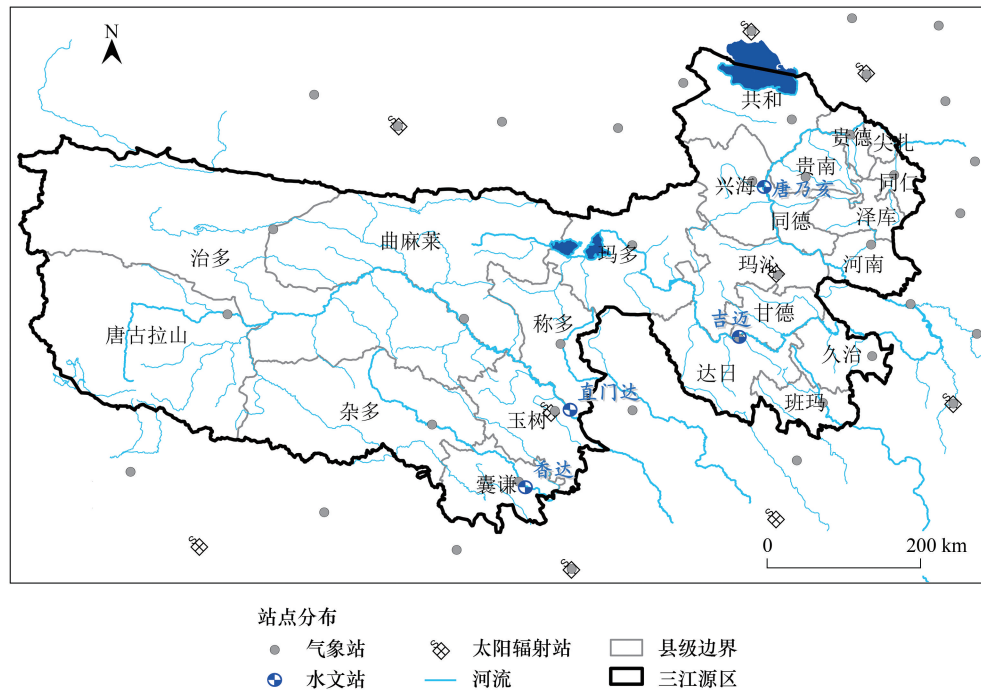


图 1 三江源区站点分布图

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations in the Three Headwater Region

源区草地退化格局在 20 世纪 70 年代中后期初步形成并快速发展^[5]。20 世纪 70 年代中期—2000 年,达日县发生退化的草地面积约占全县面积的 29.39%,玛多县约有 70% 的天然草场面积发生退化,其中大部分为重度退化;黄河源头 20 世纪 80—90 年代草地退化速度相比 20 世纪 70 年代增加了 1 倍^[26—30]。对此,本研究选取成图在上世纪 70 年代的 1:100 万植被类型图作为生态系统参照图层。结合植被类型图,将三江源区内生态系统类型重分类,划分为常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶阔叶灌丛、常绿阔叶灌丛、常绿针叶灌丛、高山草地、草原、草甸、农田、湿地、冰川积雪、水体、裸露石山、荒漠 14 个二级类别(表 1),结合 2000—2015 年生态系统类型图,进一步归为森林、灌丛、草地、农田、冰川积雪、湿地、水体和裸地 8 个一级类别。

2.2.2 径流模拟与验证

SWAT 模型是美国农业部农业研究局开发的流域尺度分布式水文模型。SWAT 模型对流域水文循环过程的模拟主要包括坡面产流过程和河道汇流演算过程,主要模拟的水分分量包括地表径流、蒸散发、壤中流、地下水四个部分,其中地表径流采用 SCS(Soil Conservation Service)曲线法进行估算,蒸散发考虑了层截留蒸发、植物蒸腾和土壤水分蒸发,壤中流采用动力贮水方法计算,地下径流主要考虑河道地下水和蓄水层补给量、基流退水系数等计算。

由于 1970 年以前气象数据缺测较多,本研究基于 1970 年以后的各水文站逐月径流数据进行参数率定与检验。具体设置为:1970 年作为模型缓冲期,1971—2000 年作为模型率定期优选模型参数,对于直门达、唐乃亥站以 2000—2017 年为模型检验期;香达和吉迈站以 2000—2012 为模型检验期。并采用纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、相对误差(Re)和决定系数(R^2)3 个指标评价模拟精度^[31—32]。

2.2.3 径流系数质量指数

以参照径流系数与实际径流系数的比值作为径流系数质量指数,评价实际生态系统相较于优良生态系统径流调节功能的偏离情况,具体计算公式如下:

$$RA_{rc}^i = \frac{R_{mi}}{R_i}$$

表 1 三江源区生态系统类型划分
Table 1 Classification of ecosystem types in the Three Headwater Region

重分类 Reclassification		原植被类型图分类 Classification of vegetation type		生态系统类型图分类 Classification of ecosystem type
一级分类 The primary classification	二级分类	植被大类	植被亚类	
森林 Forestland	常绿针叶林	针叶林	寒温带和温带山地针叶林 亚热带和热带山地针叶林	有林地 疏林地 其他林地
	落叶阔叶林	阔叶林	亚热带落叶阔叶林 温带落叶阔叶林	
			温带落叶阔叶林	
灌丛 Shrub land	落叶阔叶灌丛	灌丛	温带落叶灌丛 亚高山落叶阔叶灌丛	灌木林
	常绿阔叶灌丛		亚高山硬叶常绿阔叶灌丛	
	常绿针叶灌丛		亚高山常绿针叶灌丛	
草地 Grassland	高山草地	高山植被	高山垫状植被 高山稀疏植被	高覆盖度草地 中覆盖度草地 低覆盖度草地
	草原	草原	温带禾草、杂类草草甸草原 温带丛生禾草典型草原 温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原 高寒禾草、苔草草原	
	草甸	草甸	温带禾草、杂类草盐生草甸 高寒嵩草、杂类草草甸	
			一年一熟短生育期耐寒作物(无果树) 一年一熟粮食作物及耐寒经济作物、落叶果树园	
农田 Agriculture land	农田	栽培植被		旱地
湿地 Wetland	湿地	沼泽	高寒沼泽	滩涂 滩地 沼泽地 永久性冰川雪地
冰川积雪 Ice snow	冰川积雪	无植被	无植被	河流 湖泊 水库坑塘
水体 Water	水体			
裸地 Baren land	裸露石山			沙地 戈壁 盐碱地 裸土地 裸岩石质地 其他
	荒漠	荒漠	温带草原化灌木荒漠 温带半灌木、矮半灌木荒漠 温带多汁盐生矮半灌木荒漠 高寒垫状矮半灌木荒漠	

式中, RA_{rc}^i 为第 i 个像元径流系数质量指数, R_i 为第 i 个像元的实际径流系数, R_{mi} 为第 i 个像元的参照径流系数。当 R_i 等于 0 时或 $RA_{rc}^i > 1$, RA_{rc}^i 取为 1。

S_{rc}^i 计算公式如下:

$$S_{rc}^i = 100 - (1 - RA_{rc}^i) \times S_R$$

式中, S_{rc}^i 为第 i 个像元径流系数质量指数得分, S_R 为实际径流系数质量指数偏离参照生态系统的比例系数, 取值为 10。当 S_{rc}^i 大于或等于 100 时按 100 计, 径流系数质量指数得分越高, 说明实际生态条件下的径流系数越接近参照条件下的径流系数, 两者偏离越小。

县域尺度径流系数质量指数得分为该县域内各像元径流系数质量指数得分的均值:

$$S_{rc}^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{rc}^i$$

式中, S_{rc}^c 为县域径流系数质量指数得分, S_{rc}^i 为第 i 个像元径流系数质量指数得分, n 为县域像元总个数。

3 结果与分析

3.1 参数率定与验证

结合已有文献, 并利用 SWAT-CUP 软件对模型参数进行敏感性分析, 发现三江源区各水文站控制范围内

的地表水文过程参数 CN_2 (径流曲线系数)、ESCO (土壤蒸发补偿系数)、SOL_AWC (土壤可利用水量) 较为敏感; 地下水文参数 ALPHA_BF (基流 α 系数)、GW_DELAY (地下水滞后系数) 较为敏感。此外长江流域和澜沧江流域 CH_K2 (主河道有效导水率) 不全为 0, 3 个流域的主要模型参数情况见表 2。表 3 中各水文站点径流量验证结果显示, 率定期和检验期各站点径流模拟结果均具有较好的精度^[33], SWAT 水文模型在三江源区具有较好的适用性。

表 2 三江源区 SWAT 模型参数调整表

Table 2 Parameter results of the SWAT model for the Three Headwater Region

流域 Basin	长江 The Yangtze river	黄河 The Yellow river	澜沧江 The lancang river	参数调整 Parameter adjustment
CN_2	5—20	5—20	5—20	绝对变化量
ESCO	0.98	0.92	0.98	实际取值
SOW_AWC	-0.02	0	-0.04	绝对变化量
GW_DELAY	31	120	365	实际取值
ALPHA_BF	0.048	0.048	0.013, 0.04	实际取值
CH_K2	0—2	0	50	实际取值

CN_2 径流曲线系数 Initial SCS runoff curve number for moisture condition II; ESCO 土壤蒸发补偿系数 Soil evaporation compensation factor; SOL_AWC 土壤可利用水量 Available water capacity of soil (mm/mm); ALPHA_BF 基流 α 系数 Baseflow alpha factor (days); GW_DELAY 地下水滞后系数 Groundwater delay (days); CH_K2 主河道有效导水率 Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)

表 3 月径流模拟结果评价表

Table 3 Estimation of monthly runoff simulation results

时期 Period	站点 Station	纳什效率系数 NSE Nash-Sutcliffe efficiency coefficient	相对误差 Re Relative error	决定系数 R^2 Coefficient of determination
率定期 Calibration	直门达	0.83	0.93%	0.84
	吉迈	0.68	3.39%	0.69
	唐乃亥	0.77	-3.56%	0.77
	香达	0.8	4.55%	0.82
检验期 Validation	直门达	0.84	-0.17%	0.87
	吉迈	0.72	3.87%	0.74
	唐乃亥	0.72	5.84%	0.77
	香达	0.75	-10.33%	0.77

3.2 生态系统类型变化

结果显示 (图 2), 20 世纪 70 年代, 草地和湿地为三江源区主导生态系统类型, 草地面积占比高达 80.58%, 湿地面积占比为 7.37%。70 年代至 2000 年期间, 三江源区草地生态系统退化严重, 大量草地向裸地转化, 草地面积减少比例为 16.77%, 主要集中在长江源西部和北部区域, 黄河源区北部区域; 湿地生态系统面积也大幅减少, 减少比例为 51.63%, 主要集中在长江源西南部区域和黄河源西部源头区。2000—2015 年, 草地和裸地为主导生态系统类型, 草地、裸地面积占比分别在 66.86%—67.07% 之间, 21.22%—21.36% 之间。各生态系统面积整体变化不大, 其中, 2000—2005 年, 森林、灌丛、草地和农田面积共减少 685.37 km², 裸地增加 584.99 km²。2005—2015 年, 草地和裸地面积分别减少 153.88 km²、324.17 km², 森林、灌丛和农田面积基本稳定。

3.3 径流调节功能时空动态变化

3.3.1 径流量时空变化

2000—2017 年三江源区实际多年平均径流量为 495.15 亿 m³, 比参照系高 26.78 亿 m³, 各年实际径流量均高于参照系径流量, 2012 年两者差值最大, 约为 48.83 亿 m³, 2015 年差值最小, 约为 11.47 亿 m³, 参照系径流和实际径流的历年差别率在 4%—9% 之间 (图 3); 2000—2017 年实际多年平均地表径流量为 96.64 亿 m³, 比参照系高 28.04 亿 m³, 各年实际地表径流量均高于参照系, 参照系地表径流和实际地表径流的历年差别率

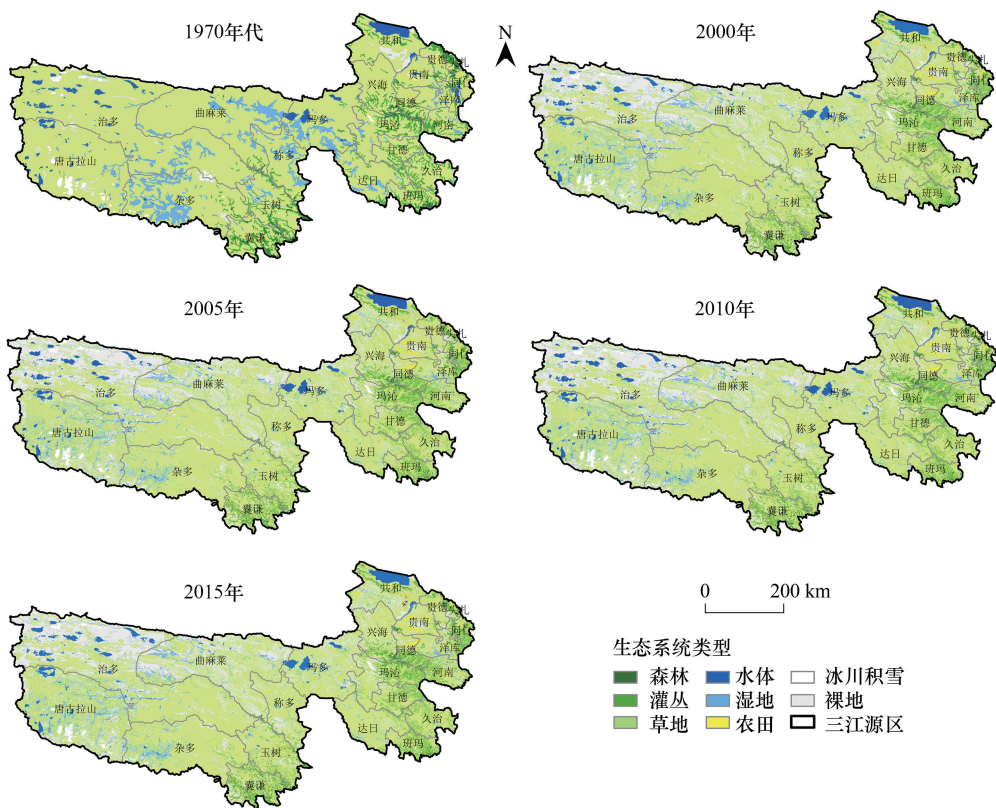


图 2 三江源区生态系统分布图

Fig.2 The ecosystem map in the Three Headwater Region

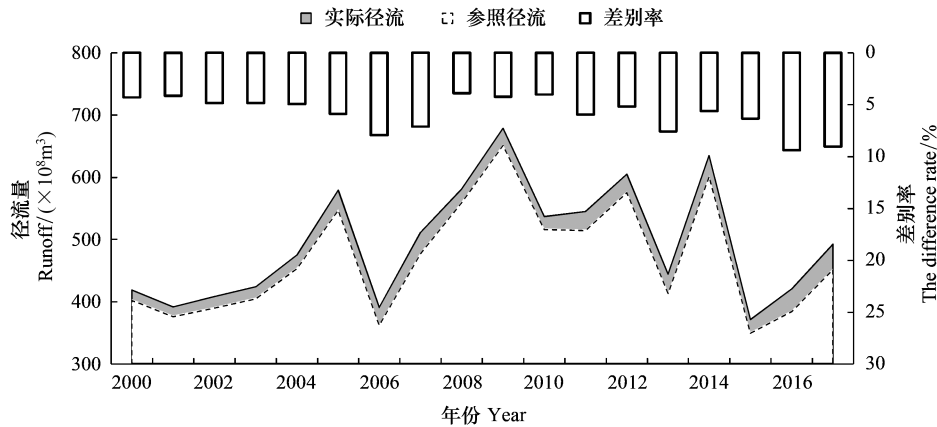


图 3 三江源区不同情景下的径流量时间变化

Fig.3 Changes of runoff under different scenarios in the Three Headwater Region

在 22%—58% 之间(图 4),表明三江源区生态系统的退化增加了总径流,尤其是地表径流显著增加,而壤中流和地下径流则明显减少。

2000—2017 年三江源区多年平均径流空间分布图(图 5)显示,参照系和实际生态系统条件下的径流空间分布特征基本一致,总体呈现东部和南部高,西部和北部低的分布特征,降水空间差异是影响径流空间差异的主要因素。2000—2017 年,三江源区多年平均径流为 125.35 mm,其中 43.71% 的区域低于 100 mm,37.81% 的区域在 100—200 mm 之间。从图 5 可看出,三江源区大部分地区实际径流高于参照径流,其中黄河源区曲麻莱东部和玛多县实际径流与参照径流差别最大;实际径流与参照径流差别较小的地区主要分布在湿地面积

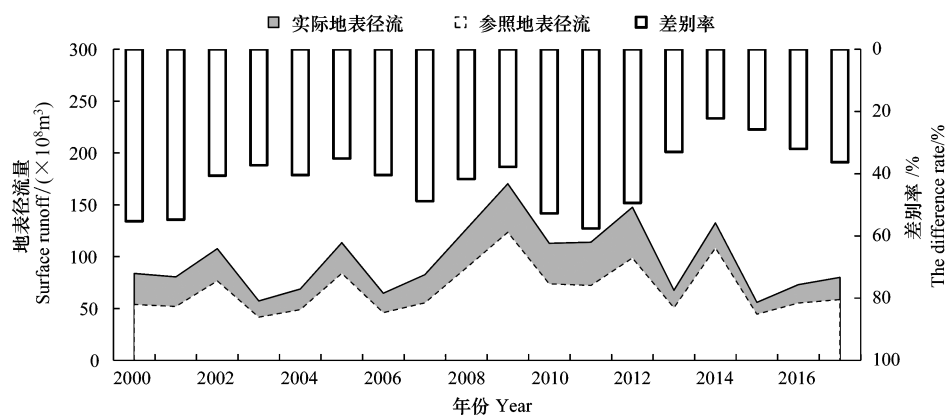


图4 三江源区不同情景下的地表径流量时间变化

Fig.4 Changes of surface runoff under different scenarios in the Three Headwater Region

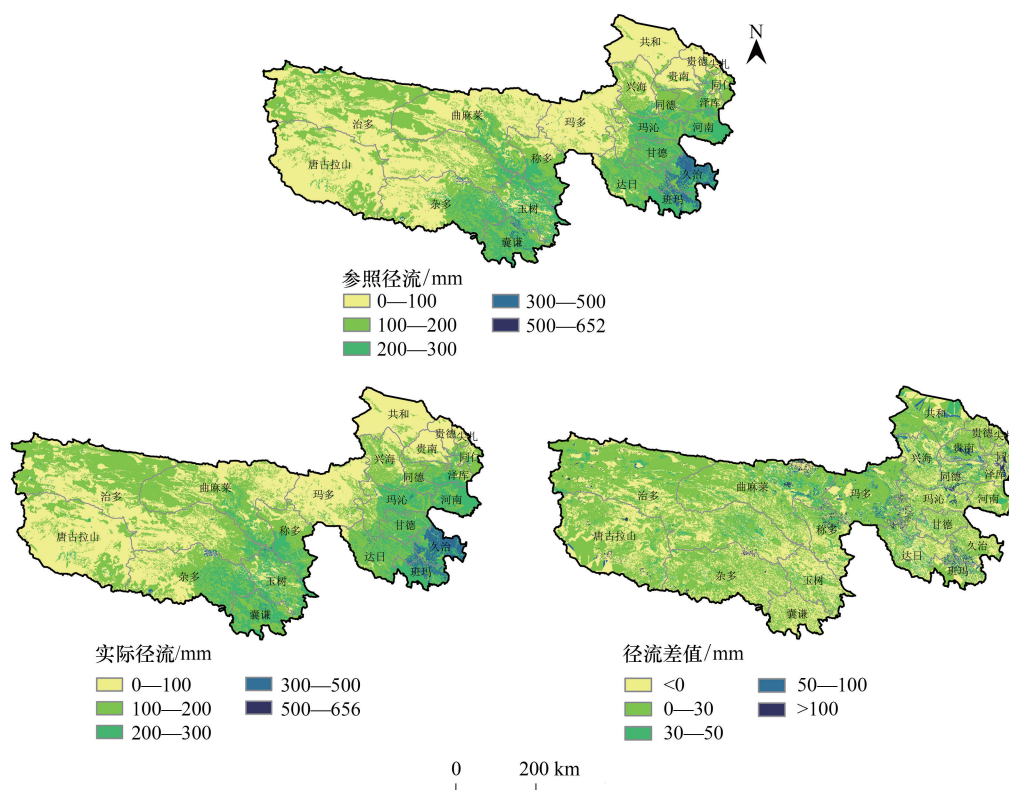


图5 三江源区不同情景下的多年平均径流空间分布

Fig.5 Spatial distribution of perennial average runoff under different scenarios in the Three Headwater Region

明显增加的唐古拉山镇(约增加了 3810 km²)、草地面积增加明显的玉树县(约增加了 1663 km², 增长约 15.09%)以及部分草地转化为森林生态系统的囊谦县中东北部、兴海县南部等地区。

2000—2017 年三江源区多年平均地表径流空间分布图(图 6)显示,参照系和实际生态系统条件下的地表径流空间分布特征基本一致,但和总径流空间分布有较大差异,总体呈现西部高,东部低的分布特征。2000—2017 年,三江源区多年平均地表径流为 24.43 mm,其中 61.72%的区域低于 20 mm,35.80%的区域在 20—100 mm 之间。从图 6 可看出,三江源区大部分地区实际地表径流高于参照地表径流,两者差值大于 20 mm 的高值区主要在治多县北部的裸地生态系统分布区、称多县东部和海南州东部的农田生态系统分布

区、杂多县的湿地大面积退化区。降水量小且湿地面积增幅明显的唐古拉山镇、植被覆盖度增加的杂多县东南部、玉树县、治多县东南部,共和县、贵德县和贵南县实际地表径流与参照值差别较小。

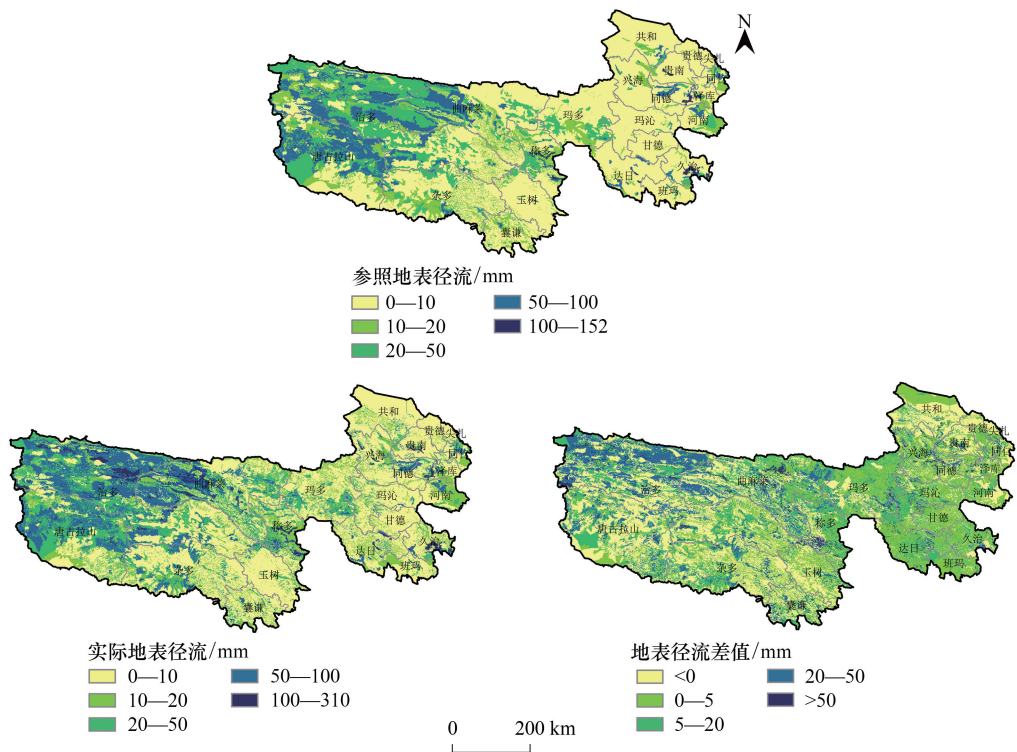


图 6 三江源区不同情景下的多年平均地表径流空间分布

Fig.6 Spatial distribution of perennial average surface runoff under different scenarios in the Three Headwater Region

3.3.2 径流系数时空变化

2017 年三江源区径流系数为 0.26,地表径流系数为 0.05(图 7),参照系条件的径流系数为 0.23,地表径流系数为 0.04。2000—2017 年,三江源区实际条件下的径流系数和地表径流系数均高于参照系条件下的数值,且两种条件下的时间动态变化较为一致,年际变化均不明显。从年均值来看,2000—2017 三江源区多年平均径流系数为 0.27,地表径流系数为 0.06,均比参照系条件下的数值高出 0.02。

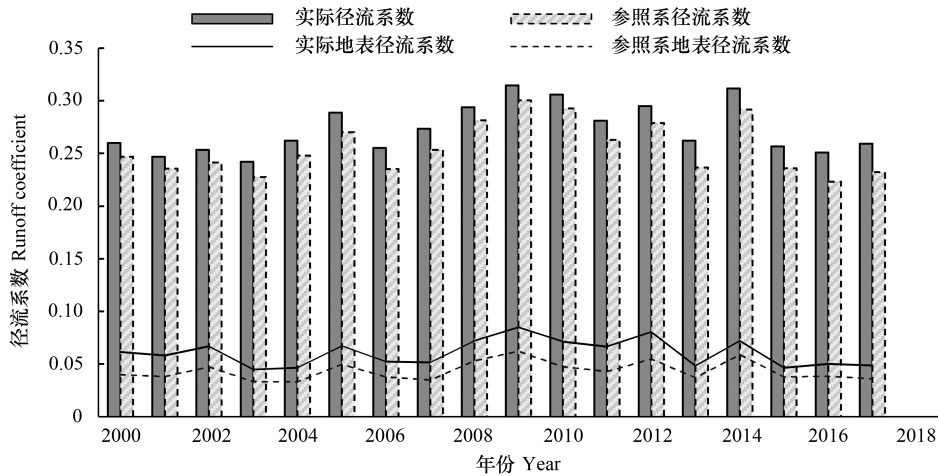


图 7 三江源区不同情景下的径流系数时间变化

Fig.7 Changes of annual runoff coefficient under different scenarios in the Three Headwater Region

三江源区多年平均径流系数与径流量的空间分布特征基本一致(图 8),地表径流系数与地表径流量空间分布特征基本一致(图 9)。实际条件下的径流系数和参照系条件的径流系数差别不大,但前者明显高于后者。相较于参照生态系统,2000—2017 年间,三江源区产流能力尤其是地表产流能力明显增加。

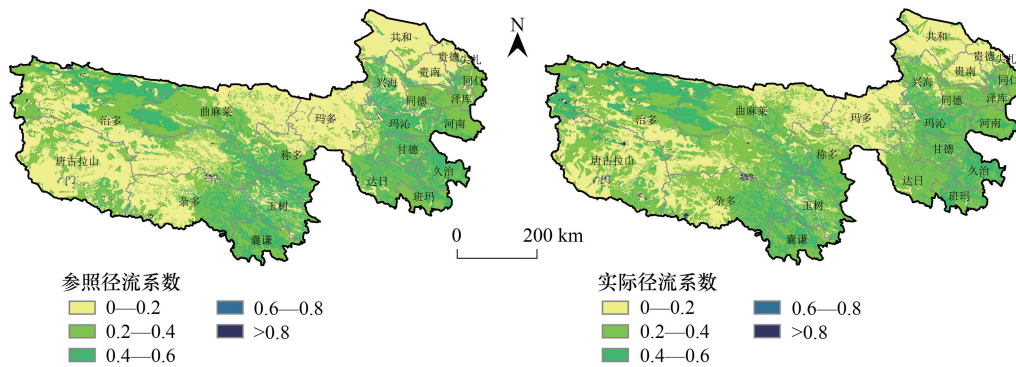


图 8 三江源区不同情景下的多年平均径流系数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of perennial average runoff coefficient under different scenarios in the Three Headwater Region

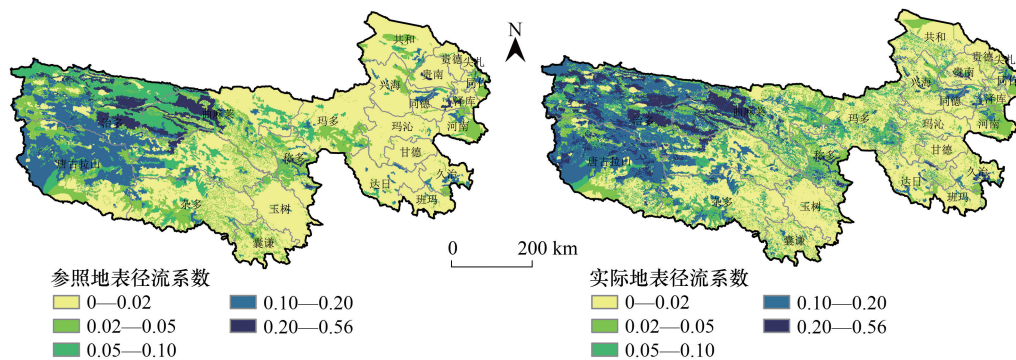


图 9 三江源区不同情景下的多年平均地表径流系数空间分布

Fig.9 Spatial distribution of perennial average surface runoff coefficient under different scenarios in the Three Headwater Region

3.4 基于参照系的径流系数质量指数变化

2000—2017 年,三江源区径流系数质量指数得分均值为 98.63,历年数值变化在 98.29—99.07 分之间;地表径流系数质量指数得分均值相较径流系数质量指数低了 1.68 分,历年数值变化在 96.43—97.71 分之间。三江源区径流系数质量指数得分呈先降低后基本平稳趋势,地表径流系数质量指数得分呈先降低后上升趋势,表明区域内生态系统质量呈先退化后逐渐恢复的变化特征。从得分直方图可知(图 10),各县(镇)径流系数得分 ≥ 98.86 的数量占比(59.09%)最多, ≤ 97.65 的数量占比(13.64%)最少;地表径流系数质量指数得分 ≥ 98.33 的数量占比(40.91%)最多, ≤ 96.39 的数量占比(22.73%)最少。

各县(镇)径流系数质量指数得分和地表径流系数质量指数得分有较大差别(表 4)。2017 年,三江源区径流系数质量指数得分高值区为班玛、甘德、久治县,低值区为唐古拉山镇、治多和杂多县。地表径流系数质量指数得分高值区为久治、河南、甘德县,低值区为玛多、囊谦和曲麻莱县。2000—2017 年三江源区各县(镇)径流系数质量指数得分变化介于-1.94—0.69 之间,得分变化率介于-1.95%—0.71%之间;各县(镇)地表径流系数质量指数得分变化介于-0.34—1.84 之间,得分变化率介于-0.35%—1.90%之间。

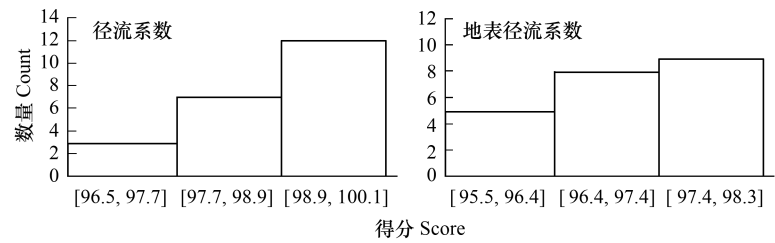


图 10 三江源区径流系数和地表径流系数质量指数得分直方图

Fig.10 Histogram of runoff and surface runoff coefficient under different scenarios in the Three Headwater Region

表 4 三江源区各县(镇)径流系数和地表径流系数质量指数得分表

Table 4 Scores of runoff coefficient and surface runoff coefficient quality index in the Three Headwater Region counties(town)

名称 Name	径流系数质量指数 Runoff coefficient quality index				地表径流系数质量指数 Surface runoff coefficient quality index			
	得分		2000—2017 年得分变化		得分		2000—2017 年得分变化	
	2000 年	2017 年	变化	变化率/%	2000 年	2017 年	变化	变化率/%
	2000 年	2017 年	变化	变化率/%	2000 年	2017 年	变化	变化率/%
共和	97.73	98.42	0.69	0.71	96.01	97.45	1.44	1.50
兴海	99.16	99.39	0.23	0.23	97.37	97.03	-0.34	-0.35
贵南	98.93	98.55	-0.38	-0.38	98.42	98.10	-0.31	-0.32
贵德	99.76	99.01	-0.75	-0.76	98.82	98.54	-0.28	-0.28
同德	99.61	99.63	0.02	0.02	98.01	98.18	0.17	0.17
尖扎	99.65	99.16	-0.49	-0.49	98.34	98.08	-0.26	-0.26
同仁	98.76	98.74	-0.01	-0.01	97.43	97.34	-0.09	-0.09
泽库	99.33	99.28	-0.05	-0.05	98.04	98.55	0.51	0.52
河南	99.98	99.95	-0.03	-0.03	99.09	99.20	0.11	0.11
玛多	97.86	97.98	0.12	0.12	96.17	96.65	0.48	0.50
玛沁	99.72	99.63	-0.10	-0.10	97.03	97.26	0.23	0.24
甘德	99.97	99.96	-0.01	-0.01	98.76	99.12	0.36	0.36
久治	99.95	99.96	0.02	0.02	97.40	99.21	1.82	1.86
达日	99.85	99.88	0.03	0.03	97.05	98.89	1.84	1.90
班玛	99.96	99.97	0.01	0.01	97.33	98.54	1.21	1.25
治多	98.91	97.67	-1.24	-1.25	97.17	97.16	0.00	0.00
杂多	99.33	97.39	-1.94	-1.95	97.51	97.55	0.04	0.04
曲麻莱	98.55	98.00	-0.55	-0.56	96.44	96.53	0.09	0.09
称多	99.28	98.85	-0.44	-0.44	96.45	97.10	0.64	0.67
玉树	99.66	99.05	-0.61	-0.61	97.56	97.39	-0.17	-0.18
囊谦	99.88	99.43	-0.45	-0.45	96.37	96.57	0.19	0.20
唐古拉山	98.53	97.85	-0.67	-0.68	97.92	98.04	0.13	0.13

4 结论与讨论

4.1 讨论

降水数据是 SWAT 模型径流模拟最重要的气象输入数据,SWAT 模型假设一个 HRU 内的下垫面具有相同的水文响应属性,在同一子流域内部的所有 HRU 采用同一雨量站数据,即降水量的空间精度为一个子流域。由于三江源区域内及周边国家基本气象站较少,本研究根据子流域划分情况,采用临近子流域内已有气象数据的加权平均对无气象站点的子流域进行气象数据插补,在一定程度上减少了气象站点不足对径流模拟结果的影响。此外,光照也是植被所必需的气候因子,光照强度直接影响植被光合作用的强弱。尤其是在水分充沛的地区,植被活动受到光照的影响最为明显^[34—35]。但三江源区域内及周边太阳辐射站不足 10 个,站

点插值也难以弥补,对径流空间模拟结果有一定影响。

基于植被类型图和生态系统类型面积变化的分析显示,20 世纪 70 年代至 2000 年期间,三江源区草地生态系统退化严重,草地面积减少了约 5.25 万 km^2 ,减少比例为 16.77%。草地面积的大幅减少使得生态系统对降水径流的蓄纳能力降低,导致实际生态系统的径流量和地表径流量均高于参照系。通过参照系和实际径流的差值分析发现,参照系径流和实际径流的差别率、参照系地表径流和实际地表径流的差别率均在 2003—2007 年最大,2008 年后有所减少。主要原因可能如下:三江源区生态保护与修复工程开始于 2005 年,2005 年之前草地退化严重,植被生态质量较差^[36],此后,受生态保护与修复工程的推进和气候暖湿化的影响,区域内草地退化问题基本得到遏制,生态质量显著好转^[37—39]。此外,受数据限制,未获取到历年生态系统类型图,本研究分别以 2000、2005、2010 和 2015 年生态系统类型图作为近 5 年基础数据,也导致 2003—2007 年的评估结果较为接近。

基于参照系的评估体系不仅能够有效避免气候波动等造成的生态系统功能年际变化的不确定性,也可以更科学准确地反映出生态系统功能现状及其变化。在参照系条件下,径流调节功能的年际空间变化主要由降水等气象因素变化引起,而在实际生态系统条件下还受生态系统变化影响。对于特定年份,降水量、生态系统类型、土壤类型和地形空间分布是影响径流调节功能空间分布的主要原因,其中降水量对径流系数贡献量最大,呈现径流系数随降水量增加而增加的空间分布特征,但对径流系数质量指数的影响则有所区别,生态系统类型变化是影响其空间分布的主要原因;对于不同年份,生态系统类型的变化是影响径流调节功能空间分布变化的主要原因。单纯基于实际径流的变化不能代表其现状值和变化的真实情况,结合参照系和实际径流差别率的变化可以更加准确地反映出三江源径流调节功能的年际变化,根据径流系数质量指数可以反映出实际径流调节功能与参照系径流调节功能的差距。

4.2 结论

(1) 2000—2017 年,三江源区多年平均径流量为 495.15 亿 m^3 ,地表径流量为 96.64 亿 m^3 ,参照系条件下数值分别为 468.37 亿 m^3 和 68.60 亿 m^3 。整体而言,三江源区年径流量和地表径流量均高于参照系。2000—2017 年,三江源区参照生态系统和实际生态系统的多年平均径流量整体呈东南高西北低的空间分布特征,地表径流量则呈西部高东部低的空间分布特征。

(2) 2000—2017 年三江源区多年平均径流系数为 0.27,地表径流系数为 0.06,均比参照系条件下的数值高 0.02。2000—2017 年,三江源区历年实际条件下的径流系数和地表径流系数均高于参照系条件下的数值,且两种条件下的时间动态变化较为一致,年际变化均不明显。三江源区径流系数与径流量空间分布特征基本一致,地表径流系数与地表径流量空间分布特征基本一致。

(3) 2000—2017 年,三江源区径流系数质量指数和地表径流系数质量指数得分均值分别为 98.63 和 96.86。区域径流系数质量指数得分呈先降低后基本平稳趋势,地表径流系数质量指数得分呈先降低后上升趋势,地表径流系数质量指数相较径流系数质量指数变化更为明显。

参考文献 (References):

- [1] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [2] Chang D H S. The vegetation zonation of the Tibetan Plateau. Mountain Research and Development, 1981, 1(1): 29.
- [3] 张永勇,张士锋,翟晓燕,夏军. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应. 地理学报, 2012, 67(1): 71-82.
- [4] 段水强,范世雄,曹广超,刘希胜,孙永寿. 1976—2014 年黄河源区湖泊变化特征及成因分析. 冰川冻土, 2015, 37(3): 745-756.
- [5] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. Grassland degradation in the “Three-River Headwaters” region, Qinghai Province. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 259-273.
- [6] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,杜云艳. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391.
- [7] 邵全琴,刘纪远,黄麟,樊江文,徐新良,王军邦. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. 地理研究, 2013, 32(9): 1645-1656.

- [8] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [9] 罗玉, 秦宁生, 周斌, 李金建, 刘佳, 王春学, 庞铁舒. 1961—2016 年长江源区径流量变化规律. 水土保持研究, 2019, 26(5): 123-128.
- [10] 刘希胜, 李其江, 段水强, 李燕, 蔡宜晴. 黄河源径流演变特征及其对降水的响应. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1721-1730.
- [11] 张士锋, 华东, 孟秀敬, 张永勇. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析. 地理学报, 2011, 66(1): 13-24.
- [12] 蒋冲, 李芬, 高艳妮, 王德旺, 张林波, 郭杨. 1956—2012 年三江源区河流流量变化及成因. 环境科学研究, 2017, 30(1): 30-39.
- [13] 张小咏. 长江与黄河源区生态系统径流调节功能变化及其影响因素的比较研究. 中国科学院研究生院, 2009.
- [14] Le Maitre D C, Kotzee I M, O'Farrell P J. Impacts of land-cover change on the water flow regulation ecosystem service: Invasive alien plants, fire and their policy implications. Land Use Policy, 2014, 36: 171-181.
- [15] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [16] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [17] 何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标. 生态学报, 2020, 40(6): 1877-1886.
- [18] 蒋冲, 王德旺, 罗上华, 李岱青, 张林波, 高艳妮. 三江源区生态系统状况变化及其成因. 环境科学研究, 2017, 30(1): 10-19.
- [19] 陈琼, 周强, 张海峰, 刘峰贵. 三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1284-1289.
- [20] 徐嘉昕, 房世波, 张廷斌, 朱永超, 吴东, 易桂花. 2000—2016 年三江源区植被生长季 NDVI 变化及其对气候因子的响应. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 237-246.
- [21] 高艳妮, 李岱青, 蒋冲, 王维, 张建军, 任小丽, 张林波. 基于能值理论的三江源区生态系统服务物质当量研究. 环境科学研究, 2017, 30(1): 101-109.
- [22] 中国科学院. 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [23] 王少丽, 臧敏, 王亚娟, 王材源, 常晓敏, 陶园. 年径流系数变化特征及预测模型研究. 水土保持学报, 2020, 34(5): 56-60, 67.
- [24] Yu Y P, Yu P T, Wang Y H, Tu X W, Zhang X P, Zhang S L, Xu L H, Wang X, Liu Z B, Wang B. Dependence of annual runoff coefficients on basin size and other properties in a climate transition zone from semi-humid to arid and semi-arid on the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2020, 591, 125727.
- [25] 刘俊, 尹洋洋, 沙晓军, 马管, 高颖会. 下垫面要素变化对径流影响的多元统计分析. 水资源保护, 2016, 32(2): 41-44.
- [26] 张镱锂, 刘林山, 摆万奇, 沈振西, 阎建忠, 丁明军, 李双成, 郑度. 黄河源地区草地退化空间特征. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14.
- [27] Zhang C L, Li Q, Shen Y P, Zhou N, Wang X S, Li J, Jia W R. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 1648-1659.
- [28] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 61-72.
- [29] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 杨林海, 南维鸽, 肖锋军. 黄河流域沙漠化空间格局与成因. 中国沙漠, 2021, 41(4): 213-224.
- [30] 赵新全, 周华坤. 三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展. 中国科学院院刊, 2005, 20(6): 471-476.
- [31] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [32] 孙倩莹, 高艳妮, 张林波, 王昊, 李凯. 基于土地利用的厦门市生态水文调节服务评估. 环境科学研究, 2019, 32(1): 66-73.
- [33] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Dugas W A, Srinivasan R, Hauck L M. Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 37(5): 1169-1188.
- [34] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [35] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. Nature, 2016, 531(7593): 229-232.
- [36] Jiang C, Zhang L B. Climate Change and Its Impact on the Eco-Environment of the Three-Rivers Headwater Region on the Tibetan Plateau, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(10): 12057-12081.
- [37] Sun Q Y, Liu W W, Gao Y N, Li J S, Yang C Y. Spatiotemporal Variation and Climate Influence Factors of Vegetation Ecological Quality in the Sanjiangyuan National Park. Sustainability, 2020, 12(16): 6634.
- [38] Han Z, Song W, Deng X Z, Xu X L. Grassland ecosystem responses to climate change and human activities within the Three-River Headwaters region of China. Scientific Reports, 2018, 8: 9079.
- [39] Shen X J, An R, Feng L, Ye N, Zhu L J, Li M H. Vegetation changes in the Three-River Headwaters Region of the Tibetan Plateau of China. Ecological Indicators, 2018, 93: 804-812.